

АВТОНОМНАЯ КОЛЛЕКТИВНАЯ КОРРЕКТИРОВКА ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА ТРАССЕ

Г.Г. Стецюра, О.В. Мосин

Аннотация. Предложен полностью децентрализованный автономный способ синхронизации взаимодействия автотранспорта, движущегося по трассе. Синхронизуется одновременная передача сигналов от группы источников сигналов группе приемников сигналов, ускоряются групповая передача данных между компьютерами автомобилей и выполнение ими распределенных вычислений. Автономность позволяет выполнять синхронизацию без взаимодействия с внешними управляющими техническими средствами. Децентрализация исключает наличие внутри группы центра, управляющего процессами синхронизации. В группе выполняется обмен сигналами по беспроводным оптическим и радиоканалам связи. Применены два взаимодействующих процесса синхронизации. Основное назначение первого процесса – децентрализованно и автономно упорядочить обмен сообщениями в группе, определить расположение членов группы, их скорости и направление движения. Первый процесс предоставляет исходную информацию для второго процесса коррекции синхронизации. Второй процесс значительно точнее учитывает изменения в движении, обеспечивая групповую одновременную доставку сообщений от многих источников многим приемникам. Сообщения синхронизируются с точностью до бита. Это, в частности, ускоряет сбор сведений о состоянии n единиц транспорта с доставкой всем приемникам только одного общего сообщения с совмещением одноименных разрядов n сообщений. В целом задача предложенных решений – поставлять данные, позволяющие корректировать движение на участках трассы, и согласовывать коллективные действия всех участников движения. При этом их управляющие компьютеры могут действовать как единый мобильный компьютерный кластер с совместным использованием ресурсов отдельных компьютеров.

Ключевые слова: автономный автотранспорт, беспилотные автоматизированные транспортные средства, синхронизация движущихся объектов, децентрализованное управление, групповое взаимодействие мобильных объектов, быстрые распределенные внутрисетевые вычисления.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с быстрым развитием беспилотных высокоавтоматизированных транспортных средств возросла потребность в средствах автоматического слежения за их движением и его корректировки. Соответствующие исследования и разработки в основном проводятся в трех направлениях, по которым имеется большое количество публикаций. В них разрабатываются средства слежения с использованием:

- 1) спутниковых средств навигации;
- 2) установленных на автомобиле радаров и лидаров;
- 3) средств технического зрения (см. обзоры [1, 2]).

Решения второго и третьего направления действуют автономно. Они определяют расстояние до других находящихся в пределах видимости автомобилей с точностью и скоростью, достаточными для обеспечения безопасного движения объекта (далее вместо понятий «автомобиль» и «транспортное средство» будем по возможности использовать слово «объект»). Но последние два направления не определяют взаимное расположение всех объектов на участке трассы. Решения первого направления определяют взаимное расположение всех объектов, но они не автономны и требуют взаимодействия со спутниками или специальными наземными станциями. По известным координатам здесь определяется взаимное расположение движущихся объектов, но точность ниже, чем для вто-



рого и третьего направления. Все направления могут использоваться совместно.

Предлагаемые в статье способы наблюдения за движением объектов на автотрассе и его корректировки автономны, децентрализованы и добавляют для указанных выше трех направлений исследований новые возможности. По сравнению с первым направлением исключена зависимость от сигналов внешних источников, точность определения расположения объектов сравнима с точностью, получаемой во втором и третьем направлениях. Для второго и третьего направлений добавлена возможность определения каждым объектом текущего положения всех объектов на участке трассы. От всех направлений предлагаемые способы отличает также новая возможность. Простые, не имеющие компьютеров средства связи позволяют компьютерам объектов выполнять ряд важных для оценки состояния объектов распределенных вычислений непосредственно в сети. Эти операции выполняются во время обмена данными между объектами, не вносят дополнительные задержки, их длительность не зависит от количества участвующих в операции объектов. Изложение приведенных возможностей разделено на две группы.

Первая группа выполняет корректировку движения – общую для всех находящихся на заданном участке трассы объектов. Объекты действуют как единый коллектив, и каждый объект предоставляет информацию о своем состоянии и действиях одновременно всему коллективу. Скорость выполнения этих действий достаточна для слежения за перемещением объектов на трассе. Сведения о текущем положении коллектива в целом позволяют принимать более качественные частные решения, а также согласовывать их. Эти задачи выполняет предложенный в статье процесс синхронизации SP_0 .

Вторая группа предъявляет более высокие требования к взаимодействию объектов. Каждый из движущихся объектов имеет управляющий компьютер, и взаимодействие объектов сводится к взаимодействию их компьютеров. Коллектив объектов следует также воспринимать как работающий в режиме жесткого реального времени (ЖРВ) компьютерный кластер, имеющий следующие особенности. Расстояния между членами кластера непрерывно изменяются во время решения текущей задачи. Состав объектов на участке трассы, т. е. состав членов кластера, изменяется за доли секунды. Входящие на участок компьютеры имеют предысторию своих действий, которую требуется учитывать. Задача управления движением состоит из совокупности мелких задач, выполняемых членами кластера в режиме ЖРВ. Ресурсы такого кластера требуется организовать как общий ресурс с

быстрым доступом к его частям. Для такого кластера имеется возможность выполнять быстрый распределенный сбор сведений о состоянии n объектов с доставкой всем объектам только одного общего сообщения, в котором совмещены одноименные разряды сообщений n объектов (см. § 5).

Действия группы компьютеров как единого кластера накладывают ограничения на длину участков трассы, в пределах которых действуют компьютеры. Действия при расстояниях в сотни метров существенно менее гибкие, чем при расстояниях в десятки метров. Это далее учитывается. Таким образом, вторая предоставляемая ниже объектам возможность состоит в том, что они действуют как единая мобильная компьютерная система.

Указанные возможности достигаются введением точной синхронизации действий объектов. При этом координаты объектов определяются с погрешностью не хуже достигнутых приведенными выше способами во всем диапазоне разрешенных для транспорта скоростей движения. Объекты действуют синхронно и обмениваются между собой сведениями о расположении объекта непосредственно в процессе определения объектом своих координат. Все активное оборудование может располагаться непосредственно на объекте. Объекты обмениваются данными об их текущем расположении с высокой скоростью, что позволяет использовать их компьютерные ресурсы как общий ресурс для решения единой задачи обеспечения безопасности движения. Решение приведенных выше задач основано на использовании процесса синхронизации SP .

Основное назначение статьи – дополнить известные решения оперативным получением данных о состоянии распределенного коллектива мобильных объектов и объединением ресурсов компьютеров, управляющих движением объектов. Разработка алгоритмов, использующих такие возможности, в статье не рассматривается.

Система, объединяющая участки трассы и находящиеся на участках объекты, имеет переменную структуру. Условия для движения на соседних участках в разные моменты времени могут существенно различаться.

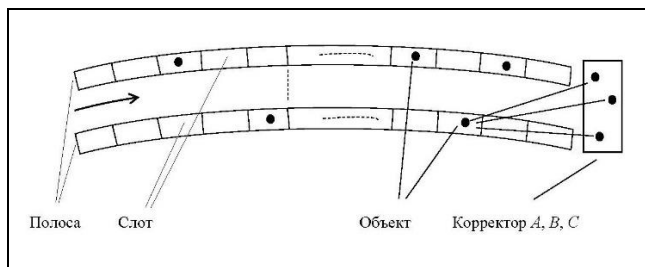
Предлагаемые решения основаны на результатах статьи [3], где рассмотрено взаимодействие мобильных объектов более общего вида, а также на более ранней статье [4] и содержат дополнения, учитывающие специфику указанных выше задач.

В § 1–3 предлагаемой статьи рассмотрена синхронизация действий объектов с точностью, достаточной для коррекции движения объектов на основе сведений о состоянии всех объектов. В § 4 пред-

лагается способ синхронизации, обеспечивающий работу компьютеров объектов как единого кластера. В § 5 показаны распределенные операции кластера, выполняемые со скоростью, не зависящей от количества их участников. В § 6 рассмотрено влияние состояния внешней среды на точность предлагаемых процессов синхронизации.

1. УЧАСТНИКИ ПРОЦЕССОВ КОРРЕКЦИИ ДВИЖЕНИЯ

Обратимся к рисунку.



Участок трассы с коррекцией движения

Трасса, по которой движутся объекты, разделена на участки длиной L метров (возможно, индивидуальной для каждого участка). В пределах участка одновременно может находиться группа, содержащая не более n объектов, их скорость и расположение изменяются во времени. На трассе выделено p полос для движения в одном направлении. Длина объекта не менее l метров. Перед каждым объектом в целях безопасности движения должен быть свободный от автомобилей участок длины (интервал) d (далее считаем $d = 2/3l$). В конце участка расположен корректор движения, который может быть пассивным или активным, содержащим источник сигналов. В наиболее простом случае это может быть пассивный корректор, содержащий не менее трех пассивных оптических ретрорефлекторов (световозвращателей), разнесенных на расстояние, достаточное для осуществления трилатерации с необходимой точностью, которые возвращают поступающий на них от движущегося объекта световой сигнал. Определение трилатерации и пример применения трилатерации в робототехнике приведены в стандарте [5]. Каждый из ретрорефлекторов снабжен светофильтром, пропускающим полосу частот, соответствующую конкретному ретрорефлектору. Обозначим фильтры и их частоты как A, B, C . Относительное расположение ретрорефлекторов в корректоре фиксировано.

Такого пассивного оборудования на трассе достаточно для выполнения примененного в § 2, 3 процесса синхронизации SP_0 . В статье дополни-

тельное усложнение оборудования на трассе вводится только по мере необходимости. Так, активный ретранслятор оптических сигналов в корректоре использован в § 4 для работы объектов в режиме мобильного кластера (для выполнения более точного, чем SP_0 , процесса синхронизации SP). В случае применения активного корректора объекты смогут посылать ему как оптические, так и радиосигналы. Показана возможность использовать в качестве корректора произвольный мобильный объект и оставить на трассе только пассивное оборудование.

Объекты содержат компьютер, управляющий их движением, источник импульсных оптических сигналов, направляющий сигналы объекта на пассивный корректор, и приемник отраженных сигналов, действующие независимо от приемопередатчиков радиосигналов, которыми обмениваются между собой объекты.

Каждый объект предварительно снабжается картой трассы. На карте фиксируются статические сведения о текущем участке трассы, например, знаки разметки, предупреждающие знаки, координаты размещения корректора, особенности взаимодействия с ним. В эти сведения включены частоты сигналов, которыми разрешено пользоваться объектам на текущем участке трассы, что упростит борьбу с сигналами-помехами. Карта также содержит аналогичные данные для следующего по направлению движения участка трассы.

Компьютер объекта наносит на карту динамическую информацию:

- текущие координаты данного объекта и всех объектов, передавших свои координаты;
- постоянный индивидуальный регистрационный номер объекта;
- описание положения корпуса объекта на карте (см. п. 2.2).

Каждая полоса движения на карте участка трассы разделяется на слоты sl длиной $l + d$, где параметры l и d определены выше. В результате карта покрывается сеткой слотов, и автомобиль может занимать один или несколько слотов.

Объект передает и принимает радиосигналы на частотах, разрешенных для текущего участка, но дополнительно принимает также радиосигналы объектов, расположенных на следующем по ходу движения участке.

Получив право передачи сообщений, объект может передать широковещательные, групповые или адресованные конкретным объектам сообщения. Полученные в сообщении новые координаты объекта одновременно корректируют карты у всех объектов.



2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ SP_0

2.1. Поочередное определение объектами расстояния до корректора движения

Так как объекту, взаимодействующему с корректором движения, известна длина участка трассы L , то известен и интервал T_1 перемещения сигнала объектов в пределах участка. Для определения расстояния объектам требуется присваивать порядковые номера, о них сказано ниже. Объекты ожидают отсутствия передаваемых ими и корректором движения сигналов в течение интервала T_1 , передают специальный радиосинхросигнал S длительности не менее T_1 и в момент его завершения S^* выполняется процесс 1 выделения очередного (вначале первого по порядку номера) объекта, который с помощью процесса 2 определяет свои координаты. Остальные объекты ожидают завершения работы первого объекта, следующий объект передает свои сигналы и т. д. до завершения аналогичных операций всеми находящимися на участке объектами. Первый объект вновь сможет определить свои координаты только после их определения всеми находящимися на участке объектами. В процессе SP_0 объекты выполняют определение координат поочередно, но они не должны ограничивать при этом допустимую для автотрасс скорость движения.

Так как очередную передачу сообщения любой объект начинает после завершения передачи сообщений всеми объектами на участке, то за это время объект может существенно изменить свое положение, не учитываемое процессом SP_0 . Это основная причина, ограничивающая точность процесса SP_0 . В § 3 и 4 будут приняты меры для уменьшения указанной паузы.

В этом разделе использован только пассивный корректор движения. Для порядковой нумерации объектов вначале будем использовать присвоенные объектам личные номера автомобилей. В РФ, например, зарегистрировано более 50 млн автомобилей. Представление этих номеров двоичными числами требует в них иметь $a = 26$ разрядов. Такой вариант нумерации наиболее простой, но медленный. В других разделах способ нумерации будет ускорен.

Далее для измерения координат объекта с использованием корректора учитываются: длина участка трассы L ; количество полос в соответствующем направлении движения p ; минимальная длина объекта l ; скорость объекта v ; максимально возможное количество объектов на указанном участке

трассы n ; скорость света c ; число двоичных разрядов, необходимых для определения идентификатора каждого объекта $a = 26$.

Будем использовать соотношения

$$T_1 = L/c; T_2 = (2a + 3) T_1; n = 3pL/5l; T_3 = nT_2, \quad (1)$$

где T_1 – интервал времени, необходимый для прохождения сигнала в пределах участка длины L , в частности, для прохождения сигнала до ретрорефлектора от объекта, наиболее удаленного от него. Интервал T_2 определяется временем, необходимым для выделения наименьшего числа в группе 2^a -разрядных чисел. К интервалу T_2 добавлен интервал времени $2T_1$ для измерения расстояния до корректора и еще один интервал T_1 для передачи данных другим объектам. За время T_1 может быть передан большой объем данных. Соотношение для n определяет максимальное количество объектов, одновременно находящихся на участке трассы с количеством полос движения p . Здесь множитель $5/3$ перед l учитывает рекомендуемую в литературе минимальную дистанцию до следующего объекта d размером в $2/3$ длины корпуса автомобиля. По истечении интервала времени T_3 все находящиеся на участке объекты завершают измерения расстояний и объекты начнут новый цикл определения расстояний до корректора. Если количество объектов меньше n , то часть интервала T_3 не будет использована. Будем считать, что скорость объектов на трассе $v \leq 180$ км/ч (50 м/с).

Все находящиеся на участке объекты должны начать измерения времен и расстояний с минимальным разбросом во времени. Для этого они применяют процесс 1.

Процесс 1 (определение объекта с текущим наименьшим номером).

Шаг 1. Объект передает с помощью радиосигналов значение старшего двоичного разряда своего порядкового номера (старшего из разрядов, не переданных в этом процессе ранее), содержащего a разрядов. Значение «1» передается сигналом частоты f_1 , значение «0» – сигналом частоты f_0 .

Шаг 2. Если на шаге 1 передавший сигнал f_1 объект получает от других объектов сигнал f_0 , то он прекращает выполнение процесса 1. Оставшиеся объекты переходят к шагу 3.

Шаг 3. Объект проверяет, есть ли разряды двоичного номера, не переданные на шаге 1. Если они есть, то объект возвращается к шагу 1, иначе процесс 1 завершен.

Замечание к шагу 1. Исходный вариант этого простого процесса – способ ДПУ (децентрализованное приоритетное управление), в котором право передачи сообщения получает объект, имеющий наибольший текущий приоритет. Для проводной

шины этот способ разработан в ИАТ (позднее ИПУ) АН СССР в 1970 г. [6]. Расширение возможностей ДПУ дано в монографии [7], он применялся в АСУТП, беспроводной его вариант взят из статьи [3].

Следующий за процессом 1 процесс 2 определяет координаты объекта.

Процесс 2 (определение координат объекта).

Шаг 1. Источник оптических сигналов объекта посылает в корректор ретрорефлекторам A, B, C одновременно сигналы в полосах частот A, B, C . Ретрорефлекторы A, B, C возвращают сигналы объектам. Каждый из этих сигналов принимает соответствующий ему приемник на объекте. С источником и приемниками сигналов соединены таймеры. При посылке сигнала источник включает одновременно все таймеры. При получении отраженного сигнала принимающий его приемник останавливает связанный с ним таймер.

Замечание к шагу 1. Одновременная передача сигналов на три ретрорефлектора A, B, C позволяет процессу SP исключить влияние перемещения объекта на точность измерений при выполнении компьютерами объектов быстрых процессов (см. § 5). При этом измеренные расстояния до рефлекторов в момент выполнения последнего измерения расстояния будут минимально отличаться от реальных.

Шаг 2. С учетом скорости сигналов c и отсчетов таймеров компьютер объекта определяет расстояния до ретрорефлекторов и, используя способ трилатерации, вычисляет координаты объекта относительно положения корректора.

Чтобы исключить влияние на приемники сигналов со стороны источника, таймеры включаются при завершении передачи сигнала и выключаются при завершении приема отраженных сигналов.

Шаг 3. Объект передает с помощью радиосигналов свои координаты (при необходимости, сопровождающиеся дополнительной информацией) одновременно всем объектам и с помощью специального радиосигнала rs^* информирует объекты о завершении своего измерения.

Координаты объект передает другим объектам с помощью радиосигналов в дополнительном интервале времени длительностью T_1 . Эта передача может быть совмещена с измерением другим объектом его расстояния до корректора при посылке последнему оптических сигналов.

Вариант шага 3. Объект, посылая сигналы A, B, C , передает радиосигнал всем объектам о посылке сигнала. В моменты возвращения каждого из них объект посылает соответствующие радиосигналы другим объектам. Последние на основании полученных данных своими средствами вычисляют координаты посланного сигнала объекта.

Замечание к процессу 2. В процессе в каждый момент времени участвует единственный источник сигнала и единственный корректор, передающие единственный сигнал. Поэтому полезный сигнал корректора поступает в приемники раньше его внешних отражений и не влияет на измерение. На шаге 3 приемник получает сообщение с посылкой двоичных нуля и единицы разными частотами.

Требуется убедиться прежде всего в том, что упорядочение действий объектов не ограничивает скорость движения на трассе. Кроме того, приход новых объектов на участок трассы с меньшими порядковыми номерами, чем у существующих, не должен запретить последним определить свои координаты. Покажем, что эти условия выполнены.

Вначале об упорядочении действий объектов. Пусть в некотором месте участка трассы происходит событие S^* – исчезновение сигнала S . Находящиеся рядом объекты начнут передачу значения старшего разряда своего номера. Через время T_1 эти сигналы покинут пределы участка. Через интервал T_1 после события S^* самые удаленные от этого события объекты пошлют свои сигналы, соответствующие значению их старших разрядов номера. Через время T_1 эти сигналы также покинут пределы участка и может быть начата передача следующего разряда номера и т. д.

На участке не может одновременно находиться более $n = 3pL/5l$ объектов. Измерение их координат, следуя соотношениям (1), потребует T_3 секунд, где

$$T_3 = nT_2 = n(2a + 3)T_1 = 3p(2a + 3)L^2/5lc. \quad (2)$$

При скорости v объект за время T_3 сместится на $\Delta S = vT_3$ метра. Для приведенных выше $L = 50$ м, $l = 2$ м, $p = 10$, $a = 26$, $v = 50$ м/с имеем $\Delta S = 7,125$ см. В результате расположение объектов на картах не изменится, объекты сместятся менее чем на 3% длины слота.

Аналогично, при входе нового объекта на участок трассы со скоростью v до занятия новым объектом одного из слотов участка измерения для всех объектов будут завершены.

Полученный результат приемлем для измерения координат, но его можно улучшить, исключив зависимость от числа a путем изменения способа нумерации объектов. Этот вопрос будет рассмотрен в § 3.

2.2. Правила при движении объектов на участке трассы и при входе на новый участок

Вернемся к карте, определенной в п. 1.1. Стандартное перемещение объекта от слота к слоту происходит в пределах занимаемой им полосы



движения. Перед объектом должен быть свободный участок полосы длиной не менее $l + d$ метров. Стандартное перемещение не требует согласования с другими объектами. Переход на другую полосу движения требует согласования с объектом, находящимся на этой полосе. Детали их взаимодействия – вопрос конкретной реализации, но изложенные выше действия дают объекту возможность передать свой запрос и многократно обмениваться деталями перемещения.

Два следующих одно за другим измерения (или два одновременных измерения, выполненных из разных мест на корпусе объекта) позволяют объекту определить текущую ориентацию своего корпуса и его положение на полосе. Эти данные объект сообщает другим объектам.

Таким образом, в рамках § 2 объекты своевременно информируют соседей на участке трассы о своем положении на трассе, но процесс управления перемещением объектов не рассматривается.

Так как объект имеет карту следующего участка, на который он переходит, то для него переход сведется к смене частот сигналов и использованию карты нового участка.

3. УСКОРЕНИЕ ПРОЦЕССА SP_0

В этом разделе точность измерения координат объекта повышена путем исключения зависимости показателя степени a от количества номеров автомобилей, что уменьшает интервал времени между очередными измерениями расстояния до корректора движения.

Теперь порядок измерений диктует карта, точнее разделенный на указанные ранее n нумерованных слотов текущий участок трассы. Начинается процесс измерений, как и ранее, но после завершения сигнала S право выполнить измерение получают поочередно все *слоты* участка. Если объект занимает несколько слотов, он подтверждает занятие каждого слота. При отсутствии на слоте объекта интервал времени, выделенный слоту, остается незанятым. Так как карты у всех объектов одинаковы, то при необходимости процесс измерения ускоряется учетом только слотов, занятых объектами. Объект на карте отмечен также индивидуальным номером автомобиля.

В результате получаем $T_1 = L/c$; $T_2 = 3T_1$; $n = 3pL/5l$; $T_3 = 3nL/c$. Теперь за время T_3 объект сместится на $\Delta S = 3vnL/c$ метра. Для примера из п. 2.1 получим $\Delta S = 0,375$ см. Состояние внешней среды может влиять на точность измерений (см. § 6).

Слоты позволяют использовать на участке трассы не один, а несколько корректоров. Для сло-

та или группы слотов будет выделен свой корректор, дающий наиболее четкий сигнал. Разные корректоры смогут реагировать на разные наборы полос частот A, B, C . На карте объектов будет указано, каким объектом для конкретного слота следует пользоваться.

Об упорядочении доступа новых объектов к участку трассы. Выше рассмотрен последовательный процесс определения положения объектов, находящихся на участке трассы. Теперь рассмотрим упорядочение доступа объектов на новый участок.

Назовем зоной доступа участок трассы, находящийся в конце участка трассы непосредственно перед корректором движения. Длина зоны доступа L^* – это длина слота, т. е. $1,67 l$ метров, на ней может находиться не более $n^* = p$ объектов, по одному объекту на каждой из полос. Объекты, находящиеся в зоне, удалены от ближайшего корректора на расстояние L^* . Небольшие значения L^* существенно ускоряют определение координат входящих на следующий участок объектов.

Отнесем зону одновременно к текущему и следующему участкам трассы. Перед входом в зону объект проводит измерения, используя ближайший корректор текущего участка. Находящийся в зоне объект получает право входа на первый слот следующего участка и входит в него подобно действиям всех объектов этого участка для перехода на следующий слот. То есть количество слотов участка увеличено на количество слотов зоны.

Объекты могут использовать для входа в зону порядковые номера автомобилей или номера слотов на картах объектов и применяют процессы 1 и 2. В результате они получают входные номера на следующем участке, начинающиеся с единицы (см. п. 2.1). Далее их перемещение будет отслеживаться изложенными выше способами § 2 или 3 статьи.

Необходимость упорядочения действий объектов возникает также при входе на трассу извне. Этим разделом завершается рассмотрение определения координат объектов с использованием номеров автомобилей или находящихся у объектов карт местности.

4. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА SP

В процессе SP ускорение синхронизации достигается путем исключения в периоде T_3 зависимости от количества объектов n . В результате за время, требуемое в процессе SP_0 для измерения времени переноса сигнала до ретранслятора для одного объекта, будут определены времена для всех объектов. За это время все объекты сместятся на

меньшее расстояние. Точность синхронизации ускорит работу объектов в режиме мобильного компьютерного кластера. Будет выполнено еще одно необходимое для этого режима условие. В распределенной системе требуется синхронизовать посылку сообщений группы объектов-источников так, чтобы они в заданном порядке (например, одновременно) поступали в группу приемников. Способ сделать это состоит в замене группы источников одним источником, который перешлет без задержки сообщения группы источников приемникам. В качестве такого источника здесь используется общий ретранслятор и обработчик сигналов [4]. Тогда источники, находящиеся на разных расстояниях от ретранслятора, учтут эту разницу, задерживая передачу сообщений в ретранслятор. Далее последний, получая синхронизованные с помощью задержек сообщения объектов, посылает их одновременно без задержки всем объектам. Синхронизация достигнута. Ретранслятор может быть более одного, что позволит общую задачу управления движением разделить на взаимодействующие, но асинхронно выполняемые задачи. Перейдем к деталям процесса SP .

Будем считать устройством, способным работать как ретранслятор, стационарный активный корректор движения, содержащий собственные приемники и источники сигналов. Такой активный корректор движения далее обозначим как CR . Будем также считать, что процесс SP_0 выполнен, объекты определили расстояние до корректора и для действий процесса SP выделен отдельный канал связи, отличный от канала, занятого процессом SP_0 .

Учтем также, что у каждого объекта на его электронной карте отмечена текущая удаленность от корректора для всех объектов. Считаем, что процесс SP_0 выполнен и времена передачи сигналов от объектов до корректора CR известны.

Введем понятие логической шкалы – последовательности LS двоичных разрядов, каждый из которых выделен отдельному слоту карты.

В синхронизации SP в посылке шкалы LS участвуют все объекты на участке, например, следующим способом. Объекты посылают в корректор CR рассмотренный выше сигнал S , который корректор CR возвращает объектам на другой частоте в виде нового сигнала Scr . Объект, обнаруживший Scr^* – момент завершения сигнала Scr , посылает с задержкой импульсный сигнал s так, чтобы он поступил в корректор CR в середину своего разряда логической шкалы. С обеих сторон сигнала s в разряде оставлено свободное место.

Объект посылает сигнал в корректор CR с задержкой $D = T_1 - T_i$. Здесь T_1 – время переноса сиг-

нала в пределах участка трассы, T_i – время переноса сигнала между объектом с номером i и корректором CR . При такой задержке одноименные разряды шкал всех объектов поступят в корректор CR в заданные моменты времени, образуя общую шкалу.

CR ретранслирует всем объектам шкалу LS в виде аналогичной шкалы LS^* , вместо сигналов s содержащей сигналы s^* другой частоты. Из-за движения объектов положение сигнала s^* в разряде сместится и объект проведет соответствующую коррекцию расстояния до корректора CR .

Оценим влияние движения объектов на точность измерений времени объектами. Интервал времени Δt , занимаемый разрядом шкалы, определяется скоростью движения объектов. Движение объектов не должно приводить к переносу сигнала s^* из разряда, принадлежащего конкретному объекту, в соседний разряд, принадлежащий другому объекту. За интервал времени между отправкой объектом сигнала в корректор CR и получением ответного сигнала s^* объект может сместиться на $\Delta s = 2vL/c$ метра. Из-за изменения расстояния сигнал s^* в шкале сместится на интервал времени $\Delta t = 2vL/c^2$ секунд, и длительность разряда шкалы не должна быть меньше этой величины. Для приведенных выше в примерах значений L и c значение $\Delta t = 0,056$ пс. Таким образом, передача шкалы может выполняться на очень высоких скоростях. Все n разрядов шкалы будут переданы за 8,4 пс, и за время обмена объекта с корректором CR единственной парой сигналов s/s^* можно передать шкалу 396 раз. Зависимость времени измерения расстояния от количества объектов n сохранилась, но уменьшилась во много раз, что делает ее для процесса SP несущественной.

До настоящего момента в процессе SP использовался активный стационарный корректор движения CR . Покажем вариант сочетания пассивного стационарного корректора и мобильного CR (mCR). Пусть до начала выполнения процесса SP один из объектов выделен для действия как mCR . Объект mCR определяет свои текущие координаты, измеряя расстояние до корректора CR . Координаты mCR становятся известны всем объектам, которые далее выполняют действия SP , обмениваясь сигналами с ним, а не со стационарным координатором.

Настоящий раздел завершает изложение способов синхронизации взаимодействия объектов на трассе. В следующих разделах будет рассмотрено применение процесса SP и влияние внешних помех на работу процессов SP_0 и SP .

Завершая описание процессов синхронизации, обратим внимание на два известных направления исследований и разработок технических средств,



полезных при реализации рассмотренных в § 1–4 процессов:

- Может выполняться более сложный вариант синхронизации, чем оценка смещения отдельного сигнала, путем послыки специальных синхронизирующих сообщений. Так, очень точные стационарные измерения реализованы в проекте White Rabbit для физических экспериментов в ЦЕРН [8–10]. Здесь применен нониусный способ измерения дальности, заменивший послыку отдельного сигнала более сложным сообщением. Для оптоволоконных линий связи обеспечивается точность синхронизации передачи сообщений по линии лучше 100 пс на расстоянии свыше 16 км при изменении температуры в диапазоне 12,5–85,0 °C. В аппаратуре сети встроены специальные устройства, корректирующие синхронизацию.

- Механизированные средства обнаружения объектов начинают заменяться активными оптическими фазированными решетками с высокой скоростью перемещения луча [11]. В нашем случае это позволит объекту быстро определять положение корректора, более эффективно использовать энергию сигналов объекта и уменьшать помехи, вызванные отражением сигнала объекта от внешних предметов.

5. ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССА *SP*

Изложенные в данном разделе решения важны для управления поведением рассматриваемых движущихся объектов, которые снабжаются все более производительными компьютерами. В результате объект может решать все более сложные задачи управления, учитывающие текущее поведение всех объектов. Но объекты связывает очень загруженный ресурс – общий канал связи. Требуются способы выполнения объектами распределенных вычислительных и управляющих операций с низкой нагрузкой на канал, позволяющей ускорить такие операции. Такие способы приведены в настоящем разделе.

В рамках данного раздела не будем различать корректоры *CR* и *mCR* и введем для них обобщающую аббревиатуру *aCR* (*active CR*).

5.1. Управление синхронной передачей сообщений объектов

Пусть один из объектов посылает через корректор *aCR* всем объектам команду – разрешение на синхронную передачу своих сообщений. Получив команду, объекты, желающие передать сообщение,

в ответ посылают в корректор *aCR* логическую шкалу, поместив в свой разряд шкалы единицу (сигнал f_1). Чтобы шкалы всех объектов пришли в корректор *aCR* с совмещением одноименных двоичных разрядов, объект O_i посылает свою шкалу с задержкой $D_i = L_{\max} - L_i$, где L_i – расстояние от объекта O_i до корректора *aCR*, $L_{\max}$ – длина участка трассы. Созданная так шкала поступает в корректор *aCR*, и он без задержки отправляет ее всем объектам, заменяя сигналы f_1 на сигналы f_1^* . Получив от корректора *aCR* все разряды шкалы, объекты O_i посылают с задержкой D_i свои сообщения в корректор *aCR*, и последний с помощью радиосигналов рассылает полученное общее сообщение всем объектам. Объектам может потребоваться передать сообщения одно за другим, для чего достаточно передать их с учетом выполнения передачи сообщений предыдущими объектами. Получается выигрыш во времени, так как сообщения объектов передаются в виде одного сообщения со скоростью, зависящей только от выбранной частоты передачи, а не от расстояния между объектами и корректором *aCR*.

Для выполнения показанных ниже распределенных вычислений потребуется передача сообщений объектов с совмещением прихода в корректор *aCR* одноименных разрядов сообщений.

5.2. Устранение конфликтов доступа объектов к корректору *aCR*

В п. 5.1 синхронизацию объектов инициировала команда одного из объектов, но необходима также самосинхронизация источников сообщений. Предположим, что объекты определили расстояние до корректора *aCR*. Предположим также, что в текущий момент отсутствуют какие-либо сигналы и объекты могут начать передачу сообщений без специальной команды. Тогда объекты начинают передачу сообщений в корректор *aCR* и получают от него результат передачи. Если есть конфликт, то обязательно хотя бы в одном бите сообщения появятся одновременно сигналы f_1^* и f_0^* , созданные в корректоре *aCR* из посланных объектами сигналов f_1 (двоичная единица сообщения) и f_0 (двоичный ноль). Их появление воспринимается как команда начала синхронизации и выполняется процесс синхронизации, описанный в п. 5.1. Конфликт доступа устранен.

5.3. Одновременное получение данных о состоянии всех объектов

В статье [4] приведены только вычислительные распределенные процессы, в которых вычисления

проводятся непосредственно в процессе передачи сообщений, не требуя их задержки для вычисления. Целесообразность их применения в задачах о слежении за движением на трассе требует более подробного изучения потребностей в конкретных ситуациях. Поэтому ограничимся только общими характерными примерами.

Оценка состояния всех параметров для всех объектов (операции «поразрядное логическое И и ИЛИ»). Пусть состояние каждого объекта оценивается одинаковой для всех объектов совокупностью количественных параметров. Это может быть группа параметров, оценивающих состояние двигателя, тормозов, устойчивости автомобиля и т. п. Все параметры объекты передают в виде логической шкалы – двоичной последовательности, в которой каждому параметру выделен отдельный бит. Если значение параметра соответствует заданным требованиям, в бит объект заносит единицу путем передачи сигнала частоты f_1 . Иначе передается ноль с помощью сигнала f_0 . Объекты передают шкалы при поступлении к ним соответствующей команды через корректор по способу *SP*. В результате все шкалы объектов поступят в корректор с совмещением одноименных разрядов. Совмещенную шкалу получают все объекты. Если команда требовала выполнить над шкалами поразрядное логическое И, то наличие в разряде объединенной шкалы одновременно сигналов f_1 и f_0 или наличие только сигнала f_0 считается нулем, иначе единицей. Если требовалось выполнить поразрядное логическое ИЛИ, то наличие в разряде объединенной шкалы одновременно сигналов f_1 и f_0 или наличие только сигнала f_1 считается единицей, иначе нулем. Таким образом, простая синхронная ретрансляция шкал выполнила без задержки указанные вычисления за время, не зависящее от количества участвующих в ней объектов.

Нахождение максимума (минимума). Каждый объект имеет измеренные значения для всей совокупности указанных выше параметров. Для всей совокупности объектов для каждого параметра требуется найти его максимальное (минимальное) значение.

Для этого объекты посылают одновременно последовательность групп сообщений. Первая группа сообщений поступает в корректор *aCR* в виде единого сообщения с совмещением в нем одноименных разрядов сообщений. Такое сообщение передает старшую цифру значения первого по порядку параметра. Эту цифру представим в виде двоичной шкалы с количеством разрядов, равным основанию системы счисления, выбранной для задания значе-

ний параметров. Только один разряд шкалы, соответствующий значению цифры, равен единице, остальные – нули. Например, для десятичной цифры 6 шкала имеет вид 000100000. Теперь для поиска максимума (минимума) в каждом параметре выполняются следующие действия.

Для поиска максимума объекты получают от корректора *aCR* цифру и проверяют, послали они наибольшее значение старшей цифры или нет. Объекты, не пославшие наибольшее значение, далее в проверке для данного параметра не участвуют. Остальные передают аналогичную группу сообщений, но для следующей цифры значения параметра. Процесс продолжается до завершения проверки всех цифр всех параметров. В результате для каждого параметра будут выделены объекты, имеющие его максимальное значение. Аналогично выполняется поиск минимума.

Заметим, что логика определения максимума (минимума) не отличается от логики определения минимального значения порядкового номера в процессе 1 из п. 2.1. Но специальное представление цифр, уменьшившее количество операций обмена данными, и использование процесса *SP* существенно ускорили операцию.

Аналого-цифровое суммирование. Для оценки состояния всей системы объектов желательно непосредственно в корректоре *aCR* выполнять операцию суммирования группы посылаемых объектами чисел. Такие операции изложены в статье [4]. Их организация следующая. В корректор *aCR* добавляется аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Цифры суммируемых чисел представлены шкалами, как в операции определения максимума (минимума).

Покажем выполнение операции на примере суммирования десятичных цифр, одновременно посылаемых в корректор *aCR* группой объектов. Пусть в результате наложения нескольких цифр (шкал) формируется шкала 001(4)01(6)0001(7). В скобках указан уровень энергии поступающего на АЦП сигнала соответственно для цифр 7, 5, 1. Тогда корректор *aCR* раздаст всем объектам результат: передано 4 семерки, 6 пятерок, 7 единиц. Каждый объект независимо собирает сумму $4 \times 7 + 6 \times 5 + 7 = 65$. Для многоразрядных чисел аналогично обрабатываются цифры всех разрядов и формируется общая сумма. Для проведения вычитания формируются две суммы и проводится вычитание.

На основе таких операций создаются гистограммы, оценивающие состояние большого количества параметров системы. Для АЦП-операций нужны стабильные источники оптических сигнала-



лов. Такие источники существуют. В работе [12] приведен простой светодиодный источник с изменением выходной мощности ниже 50 ppm/°C. Указанные операции также выполняются за время, не зависящее от количества участников.

Приведенные операции – это примеры ассоциативной операции, в которой одновременно участвуют все объекты. Результаты операции одновременно поступают ко всем объектам и позволяют им выполнять дальнейшие действия с учетом полученных данных о состоянии всей системы.

Примеры настоящего раздела показывают, что объекты работают как единый мобильный компьютерный кластер. Он может быть разделен на асинхронно функционирующие взаимодействующие между собой малые кластеры путем применения решений статьи [13], модифицированных с учетом особенностей мобильных систем.

6. О ВЛИЯНИИ СОСТОЯНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕССЫ SP_0 И SP

Изменение состояния внешней среды, например, временное ухудшение качества передаваемых сигналов или появление помех, влияют на выполнение процессов SP_0 и SP . Рассмотренные в статье решения опираются на результаты, экспериментально исследованные и применяемые на практике в ряде областей. Поэтому для оценки реализуемости предложений статьи обратимся к соответствующим опубликованным данным.

О реализуемости пассивного корректора. На автодорогах используются дорожные знаки, которые отражают сигнал автомобиля и в темноте четко выделяются среди отражений от других предметов. Объяснение этому – знаки содержат большое количество ретрорефлекторов. Это применение ретрорефлекторов тщательно изучено, определяется ТУ, стандартами. Так как от пассивного корректора требуется только четко отличать его отражение от отражений-помех, то его применение не отличается от приведенного, и он также может быть реализуем.

О реализуемости активного корректора. Эта задача проще. Приходящий в корректор и возвращаемый им сигналы качественно различны. Помехи от них проходят больший путь, отстают от полезного сигнала и не мешают измерению удаленности объекта от корректора.

О передаче сообщений активным корректором, использующим процесс SP . В работах [14, 15] показана следующая схема взаимодействия оп-

тических источника и приемника сообщений. Приемник посылает непрерывный оптический сигнал, который поступает в ретрорефлектор источника сообщений и возвращается им приемнику. На пути возвращаемого сигнала расположен модулятор сигналов, который возвращаемый непрерывный сигнал переводит в сообщение. Проверена работоспособность системы в тяжелых условиях – расстояние между источником и приемником 7 км, морская среда, туман, волнение. Скорость передачи данных 40 Мбит/с. Здесь структура передачи сообщения похожа на передачу сообщения активным корректором. Но последний находится в лучших условиях, используя собственный источник сигналов. Пример показывает осуществимость передачи сообщений в пределах участка трассы.

Другой пример. В статье [16] для источника оптических ненаправленных цифровых сигналов на небольших расстояниях порядка нескольких метров получена скорость передачи 400 Гб/с. Структура связи следующая. В помещении находится ненаправленный светодиодный источник, модулируемый электрическими сигналами с частотой 400 Гб/с. Сообщение, посылаемое источником, получает группа приемников, к которым подключены получатели сообщений – компьютеры. Наличие запаздывающих отражений от посторонних предметов не нарушает работу системы. Работа такого источника также близка к работе активного корректора.

Выше даны только примеры оптической связи, которые могут быть полезны при создании оптических активных корректоров. Применение радиосредств более широко распространено и здесь не приводится.

О помехах от сигналов, создаваемых на соседних участках трассы. Обычно такие помехи устраняют, распределяя частоты передаваемых сигналов так, чтобы соседи использовали отличающиеся частоты. Применительно к трассе это реализуется так. Соседние k участков трассы используют различающиеся частоты оптических и радиосигналов. Затем порядок повторяется и каждый участок будет отделен от помехи $k - 1$ участком трассы. О выборе частот объект узнает из имеющейся у него электронной карты или путем опроса пассивных корректоров. В этом случае пассивный ретрорефлектор корректора должен иметь дополнительные светофильтры. Например, комбинация из трех открытых в разных сочетаниях светофильтров позволит иметь $k = 7$.

Индивидуальная коррекция уровня сигнала объекта. Подобно тому, как выполняется измере-

ние удаленности объекта от корректора, можно контролировать изменение уровня поступающего в корректор сигнала объекта. При пассивном корректоре измерение проводит объект, оценивая уровень возвращаемого в объект сигнала. Считаем условия для прохода прямого и обратного сигнала одинаковыми. Активный корректор либо посылает свой сигнал, измеряемый объектом, либо корректор содержит АЦП, который оценит уровень входящего в корректор сигнала. Так корректируется влияние внешней среды на работу системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемых способах автономной коллективной корректировки движения автотранспорта на трассе отметим их основные новые возможности.

Способы дополняют три наиболее часто применяемые виды способов: с использованием, установленных на автомобиле (объекте) радаров и лидаров, средств технического зрения и спутниковых средств навигации. Первые два способа – способы близкодействия. Они могут оценивать взаимное расположение объектов, расположенных только в пределах прямой видимости, но измеряют расстояние с высокой точностью. Третий тип определяет расположение автомобилей на большом участке трассы, ему не требуется прямая видимость, но он менее точен, чем предыдущие типы и не является автономным, зависит от внешних средств навигации. Предлагаемые в статье решения с точностью, характерной для первых двух способов, с помощью автономных средств определяют расположение объектов, находящихся на трассе вне прямой видимости.

От трех видов приведенных выше направлений предлагаемые способы отличает еще одна возможность. Простые, не имеющие компьютеров средства связи позволяют компьютерам объектов выполнять ряд важных для оценки состояния объектов *распределенных* вычислений непосредственно в сети. Эти операции выполняются во время обмена данными между объектами, не вносят дополнительные задержки, их длительность не зависит от количества участвующих в операции объектов. Точная синхронизация совместных действий позволяет совмещать одноименные разряды сообщений группы объектов, заменяя группу сообщений одним сообщением, не увеличивая количество его разрядов.

Авторы надеются, что предложенные решения будут полезны при создании все расширяющегося

рынка полностью автономных автомобильных средств, дополняя уже полученные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yurtsever, E., Lambert, J., Carballo, A., Takeda, K. A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 58443–58469. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2983149.
2. Badue, C., Guidolini, R., Carneiro, R. V., et al. Self-Driving Cars: A Survey. – 2019. – <https://arxiv.org/pdf/1901.04407.pdf>.
3. Стецюра Г.Г. Децентрализованная автономная синхронизация процессов взаимодействия мобильных объектов // Проблемы управления. – 2020. – № 6. – С. 47–56. DOI: <http://doi.org/10.25728/pu.2020.6.5>. [Stetsyura, G.G. Decentralized Autonomic Synchronization of Interaction Processes of Mobile Objects // Control Sciences. – 2020. – No. 6. – P. 47–56. (In Russian)]
4. Стецюра Г.Г. Сетевая информационно-вычислительная поддержка взаимодействия подвижных роботов // Проблемы управления. – 2018. – № 5. – С. 56–65. DOI: <http://doi.org/10.25728/pu.2018.5.6>. [Stetsyura, G.G. Network Information-Computing Support of Automatic Mobile Objects Interaction. – Automation and Remote Control. – 2019. – Vol. 80. – No. 6. – P. 1134–1147. DOI: 10.1134/S0005117919060110].
5. ГОСТ Р 60.3.3.2–2020 (ISO/TR 13309:1995) Роботы и робототехнические устройства. Роботы промышленные манипуляционные. Методы и средства оценки рабочих характеристик роботов. [GOST R 60.3.3.2–2020 (ISO/TR 13309:1995) Roboty i robototekhnicheskie ustroystva. Roboty promyshlennye manipulyatsionnye. Metody i sredstva otsenki rabochikh kharakteristik robotov. (In Russian)]
6. Катюзжанский Г.А., Нисневич Л.Б., Стецюра Г.Г. Децентрализованное приоритетное управление в одноканальной системе обмена данными // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1970. – № 6. – С. 115–119. [Katuzhanskii, G.A., Nisnevich, L.B., Stetsyura, G.G. Detsentralizovannoe prioritetnoe upravlenie v odnokanal'noi sisteme obmena dannymi // Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika. – 1970. – No. 6. – S. 115–119. (In Russian)]
7. Прангшвили И.В., Подлазов В.С., Стецюра Г.Г. Локальные микропроцессорные вычислительные сети. – М.: Наука, 1984. – 176 с. [Prangishvili, I.V., Podlazarov, V.S., Stetsyura, G.G. Lokal'nye mikroprotsessornye vychislitel'nye seti. – M.: Nauka, 1984. – 176 s. (In Russian)]
8. Moreira P., Darwazeh I. Digital femtosecond time difference circuit for CERN's timing system / London Communications Symposium, 2011. <http://www.ee.ucl.ac.uk/lcs/previous/LCS2011/LCS1136.pdf>.
9. Yu, Q., Liangfu, P., Yongqing, H. An Ultrahigh Precision Network Time Synchronization Technology // Frontiers in Signal Processing. – 2019. – Vol. 3, no. 4. – P. 82–92. <https://dx.doi.org/10.22606/fsp.2019.34004>.
10. Tancock, S., Arabul, E., Dahnoun, N. A Review of New Time-to-Digital Conversion Techniques // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2019. – Vol. 68, no. 10. – P. 3406–3417. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2936717>.
11. Sun, J., Timurdogan, E., Yaacobi, A., et al. Large-Scale Nanophotonic Phased Array // Nature. – 2013. – Vol. 493. – P. 195–199. DOI:10.1038/nature11727.



12. Bosiljevac, M., Babić, D., Sipus, Z. Temperature-Stable LED-Based Light Source without Temperature Control // Proceedings of SPIE OPTO. – San Francisco, CA, USA, 2016. – Vol. 9754. – P. 1–6. DOI: 10.1117/12.2211576.
13. Стецюра Г.Г. Компьютерные кластеры с быстрым аппаратным выполнением синхронизации сообщений и распределенных вычислений сетевыми средствами // Проблемы управления. – 2020. – № 4. – С. 61–69. DOI: <http://doi.org/10.25728/ru.2020.4.7>. [Stetsyura, G.G. The Computer Clusters with Fast Synchronization of Messages and with Fast Distributed Computing by the Network Hardware. – Control Sciences. – 2020. – No. 4. – P. 61–69. (In Russian)]
14. Rabinovich, W.S., Goetz, P.G., Mahon, R., et al. 45 Mbps Cat's Eye Modulating Retroreflectors // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46, no. 10. – 104001. <https://doi.org/10.1117/1.2789634>.
15. Rabinovich, W. Optical Modulating Retro-Reflectors // Part 4.13 in Advanced Optical Wireless Communication Systems. – Cambridge University Press, 2012. – P. 328–350.
16. Gomez, A., Shi, K., Quintana, C., et al. Design and Demonstration of a 400 Gb/s Indoor Optical Wireless Communications

Link // Journal of Lightwave Technology. – 2016. – Vol. 34, iss. 22. – P. 5332–5339.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.

*Поступила в редакцию 8.02.2021,
после доработки 12.10.2021.
Принята к публикации 18.10.2021.*

Стецюра Геннадий Георгиевич – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ gstetsura@mail.ru,

Мосин Олег Викторович – гл. эксперт Департамента безопасности АО «Рособоронэкспорт»,
✉ mosin.oleg@gmail.com.

AUTONOMOUS COLLECTIVE ADJUSTMENT OF VEHICLES MOTION ON A HIGHWAY

G.G. Stetsyura¹ and O.V. Mosin²

¹Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²JSC Rosoboronexport, Moscow, Russia

¹✉ gstetsura@mail.ru, ²✉ mosin.oleg@gmail.com

Abstract. This paper describes a fully autonomous decentralized method for synchronizing the interaction of vehicles moving on a highway. The method synchronizes the vehicles using simultaneous signal transmission from a group of transmitters to a group of receivers. With this feature, data exchange speed is increased, and the computing abilities of vehicles are connected into a moving computing cluster. The autonomous system operates without external controllers. Due to decentralization, the group of vehicles implements the synchronization process without any system control center. The group members interconnect via wireless optical and radio communication channels. There are two interacting stages of the synchronization process. The first stage is intended to perform decentralized coordination and information exchange within the group and determine the location, speed, and motion direction of the group members. The first stage passes initial information to the second stage. The second stage provides much more accurate vehicle tracking data and simultaneous information exchange between the groups of transmitters and receivers. Message transmission is synchronized very precisely (up to a single bit). In particular, necessary information about n vehicles is quickly acquired and transmitted to all receivers using one common message containing no more than n digits. Thus, the provided solution allows collecting the necessary information for vehicle coordination on highway sections, combining every vehicle's computing capability into one mobile computing cluster.

Keywords: autonomous vehicles, vehicle synchronization, decentralized object control, group interaction of mobile objects, fast in-network computing.